

# 合理化鋼床版桁橋の構造詳細と舗装亀裂防止の検討

## Structural detail of rationalized steel floor deck bridge and investigation of crack arrest of pavement

大島 俊之\*、三上 修一\*\*、山崎 智之\*\*\*、熱海 明彦\*\*\*\*、  
○高橋 宏司\*\*\*\*\*、藤田 真仁\*\*\*\*\*

Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI, Tomoyuki YAMAZAKI, Akihiko ATUMI,  
Koji TAKAHASHI and Masahito FUJITA

- \*\*工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
- \*\*博 (工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
- \*\*\*北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
- \*\*\*\* (株) 日本製鋼所 室蘭製作所鉄鋼機器橋梁部 (〒051-0006 北海道室蘭市茶津町 4 番地)
- \*\*\*\*\*北見工業大学大学院生 工学研究科博士前期課程 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Stress distribution around scallop hole of floor beam is analyzed by finite element method. Fatigue test is done on a simplified cross beam and ultrasonic inspection around fillet joint welding is used to detect fatigue crack. Echo reflected from fatigue crack is detected to identify its propagation. And longitudinal crack of pavement on steel floor deck is also analyzed in numerical calculation and it is found that weak thin layer between pavement and deck plate is effective to prevent above longitudinal crack.

Key words : rationalized steel floor deck bridge , fatigue crack detection , longitudinal pavement crack

### 1. まえがき

近年の建設業界は、建設工事費の抑制や長寿命化を目指した新たな動向が見られる。その中で橋梁業界も合理化・省力化を目指し、各研究機関が積極的に開発や提案が進められすでに建設もされている。そのため、鋼床版桁橋においてもその構造を合理化し建設コスト縮減と共に長寿命化や省力化を行う必要がある。

鋼床版に発生する応力は複雑であり、輪荷重を直接支持することから応力の繰り返し数が多く、疲労損傷が生じやすい構造であると言える。さらに、疲労損傷の多くは縦リブ・横リブ交差部のスカラップやその溶接部から発生するため、スカラップ形状の改善が必要である。

鋼床版上の舗装は、比較的薄くたわみの大きいデッキプレート上にあるため、変形により橋軸方向縦亀裂が発生しやすい。さらに舗装の温度や剛性が変化しやすいため極めて複雑な性状を示す。また、舗装は走行車両の位置によってもその変形挙動を大きく変化させる。特に、鋼床版の縦リブに閉じリブを用いた場合は、閉じリブのねじれ変形が大きいと、舗装のたわみが大きくなり舗装亀裂が発生しやすいと考えられる。

そこで本研究では4主桁構造の従来橋から2主桁構造の合理化鋼床版桁橋を設計し、横桁スカラップ付近の応力分布解析を行うと共に、載荷試験を行い解析結果を検証した。さらに、これまでに用いられている疲労に強い

スカラップ形状を有限要素解析により検討した。また、舗装を含めた合理化鋼床版桁橋モデルで解析を行い、舗装表面の横断方向ひずみを調べ舗装亀裂防止の検討を行った。さらに、荷重を橋軸直角方向に細かく移動させ、舗装亀裂が発生しやすい箇所を検討した。<sup>1) 2)</sup>

### 2. 合理化鋼床版桁橋と解析概要

合理化鋼床版桁橋とは、表1の設計条件のもとに設計された4主桁構造の従来型橋梁を2主桁構造にしたもので、デッキ厚・横桁・主桁等を厚板化したものである。こうすることで制作コストを

表1 設計条件

橋梁形式	単純鋼床版鉸桁橋
支間長	30.0m
幅員構成	総幅員 9.7m
	車道幅員 8.5m
	幹線道路
	地域区分 D 車道部 2車線
設計活荷重	B 活荷重

表2 設計詳細

	従来型橋梁	合理化鋼床版桁橋	
		閉リブ	板リブ
デッキ厚	12mm	20mm	20mm
主桁本数	4本	2本	2本
主桁間隔	3@2.6m	7.7m	7.7m
主桁腹板高	1600mm	1600mm	1600mm
主桁腹板厚	9mm	13mm	13mm
横リブ間隔	2000mm	4000mm	4000mm
縦リブ間隔	300mm	670mm	500mm

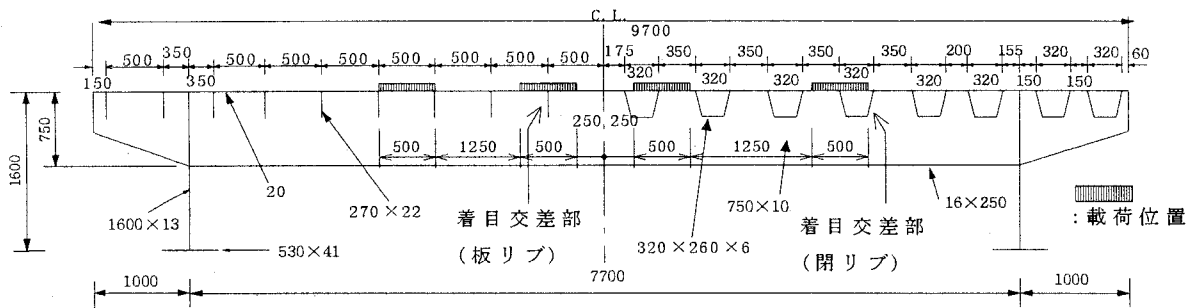


図1 合理化鋼床版桁橋断面図 (左:板リブモデル 右:閉リブモデル) (mm)

67%に削減できた。<sup>2)</sup>表2は従来型橋梁と合理化鋼床版桁橋を比較したもので、図1は合理化鋼床版桁橋の断面図(左が板リブ、右が閉じリブ)と今回解析に用いた載荷位置および着目交差部の図である。荷重は道路橋示方書<sup>3)</sup>の通りにB活荷重を適用した。載荷位置は対象性を考慮するためC.Lから250mmの位置に載荷した。

### 3. 横桁スカラップ周辺の応力分布解析

#### 3-1 板リブを用いた応力解析

板リブを用いた応力解析は、合理化鋼床版桁橋全体モデルで解析した上で図1の着目交差部付近のズーム解析を行った。スカラップ形状は図2の3種類で、図中の番号の応力値(主応力)を図3、4に取り比較した。また、スカラップ省略型は実際にスカラップを省略することは難しいためここでは参考として比較した。また、O型は比較的スカラップを省略した状態に近づけたものである

図3、4からスカラップ省略型にはあまり応力集中が発生しないことがわかる。J型とO型の比較すると、分布的にはそれほど差がない。また応力の最大値を比較すると、O型の方が有利であるがO型は溶接が多く、コスト面や疲労の面を考慮するとJ型がよいと考えられる。

#### 3-2 閉じリブを用いた応力解析

閉じリブを用いた応力解析は、合理化鋼床版桁橋全体の1/4のモデルで解析した。この解析に用いたスカラップは4種類で、Type Aは従来型スカラップで日本で多く用いられている形状である。Type Bは西ドイツの鉄道橋に用いられているスカラップで応力集中の緩和や耐疲労性を期待できる形状である。Type CはType Bを改良した形状である。Type Dは本州四国連絡橋以後、基準に示されている形状である。(図5)<sup>4)</sup>

各スカラップ形状における応力分布図を図6に、各スカラップ形状の各横桁スカラップの最大応力値(橋軸直角方向応力)を表3に示す。分布図を見ると、どのスカラップも右に引張応力、左に圧縮応力が強くなっている。これは横桁全体のたわみによりそれぞれの縦リブが図7のようなねじれ変形を起こしているためである。

J型スカラップ O型スカラップ スカラップ省略型

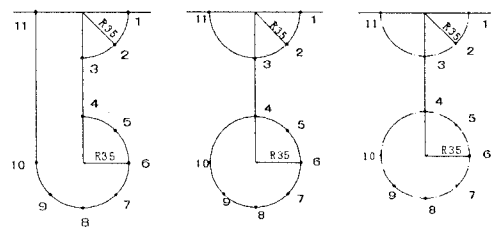


図2 スカラップ形状(板リブ)

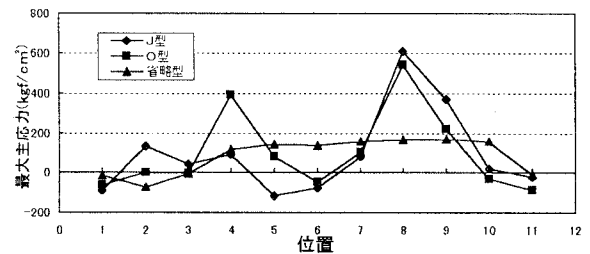


図3 スカラップ周辺の応力値(最大主応力)

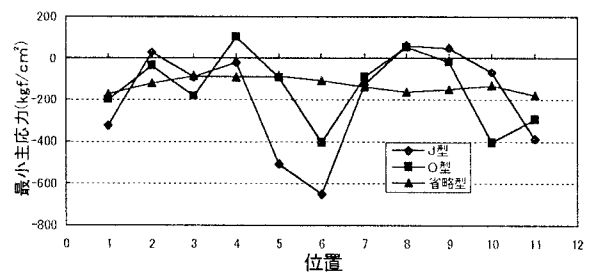


図4 スカラップ周辺の応力値(最小主応力)

表3 各スカラップタイプに対する横リブの最大応力

		Type A		Type B		Type C		Type D	
		I	II	I	II	I	II	I	II
左上スカラップ	最大圧縮	-188	-334	-100	-323	-290	-109		
	最大引張	27	279		212	138			
右上スカラップ	最大圧縮	-833	-1295	-331	-1258	-1215	-419		
	最大引張	863	1798		1746	1687			
左下スカラップ	最大圧縮	-1437	-482	-697	-1006	-1666	-1572		
	最大引張	2022	1230		1009	1788		1423	1378

上スカラップ有りはI、上スカラップ無しはII (unit:kgf/cm<sup>2</sup>)

右下スカラップはType Aで応力集中が発生していて大きな応力値となっている。そのため、他の形状と比較

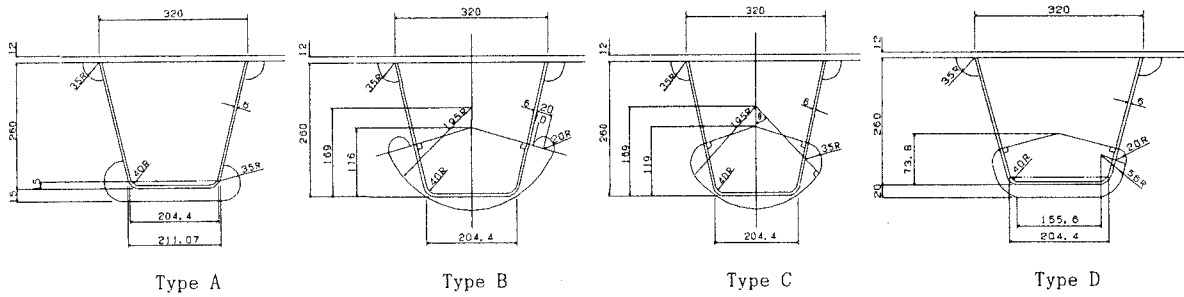


図5 スカラップ形状（閉リブ）

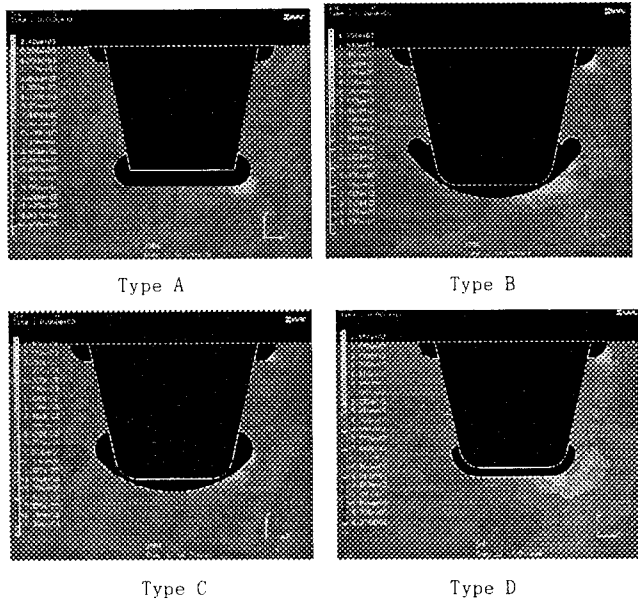


図6 縦リブ・横リブ交差部の横リブ応力分布

すると疲労に関して明らかに不利な形状である。Type Cは、応力が分散できているが、応力値は大きな値となっているため疲労に関しては適していない。Type B、Dは、応力が分散して、応力値も抑える

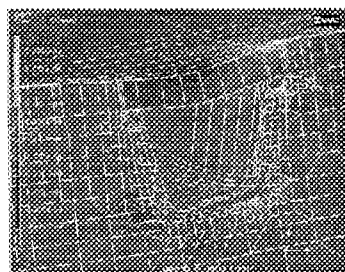


図7 着目交差部の変形図（閉リブ、変形率150倍）

形状になっている。これはスカラップ間の距離が長いほど応力が小さくなるのが原因であると言える。<sup>4) 5)</sup>このような形状のスカラップを用いると疲労に強い構造になると考えられる。しかし、右上スカラップで応力集中が発生している。そのため上スカラップを省略した形状でも解析を行った。結果は上スカラップの応力が減少して、さらに下スカラップにも効果があることがわかった。そのため、疲労に関してはType Bの上スカラップのない形状が適していると考えられる。

## 4. 疲労亀裂探傷実験

### 4-1 実験供試体

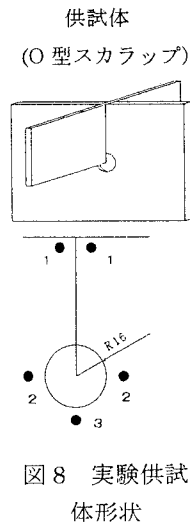


図8 実験供試体形状

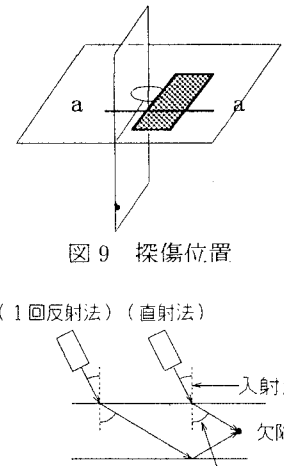


図9 探傷位置

(1回反射法) (直射法)

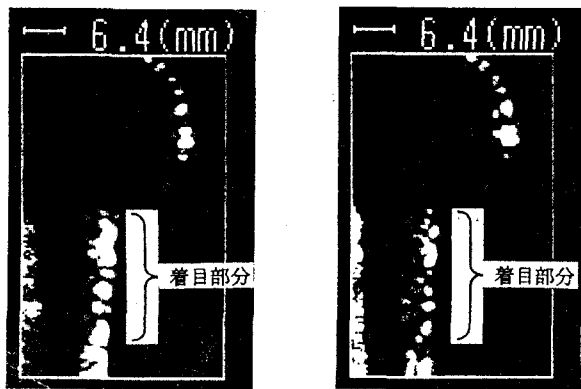
図10 直射法と1回反射法

縦リブと横リブの交差部の疲労亀裂実験に用いた供試体は図8のように板リブで、横リブ(200×300×12mm)、縦リブ(100×400×9mm)にSS400鋼材を用い、交差部にサイズ7mmの隅肉溶接をしてある。载荷条件は最大荷重180kN、最小荷重1kNで縦リブと横リブの交差部に载荷した。また、繰り返し载荷により発生する疲労亀裂を超音波探傷試験により検出した。探傷方法は水浸法による超音波探傷で斜角探傷を図9に示した網掛け位置で行い、亀裂の発生前後の画像及び波形を比較検討した。亀裂発生後では入射角や斜角探傷の手法を図10に示した直射法と1回反射法で測定した。計測システムは超音波探傷映像装置(超音波探傷器、自動走査装置、画像処理装置などから構成されている)を用いた。また、使用探触子は周波数10MHz、水中焦点距離80mmである。

### 4-2 実験結果

本実験での画像処理は強度データによるCスコープ画像とし、超音波エコーの振幅を256階調の白黒濃淡で表示しており、白く明るい部分がエコーの高い部分で、黒く暗い部分はエコーが低いか、エコーがない部分である。画像の上部にある線と数字は縮尺である。

図11(a)は载荷306万回、(b)は载荷316万回のもので、探傷の入射角18.9度(屈折角45度)、1回反射法による探傷画像(探傷範囲30×50mm、ピッチ0.1mm)である。探傷位置は図10に示した部分である。着目部分のエコーは縦リブと横リブの接合部分が完全に溶け込んでいないために残っている面(肌すき 図12)からの



(a) 載荷 306 万回 (b) 載荷 316 万回

図 11 入射角 18.9 度 - 1 回反射法

ものであり、その部分のエコー強度（白黒濃淡）を比較すると (b) の方はエコーが弱くなっている。これは、疲労亀裂が溶接部から進展し、超音波の伝達経路に入り、そこでわずかな反射・散乱が起こったためと考えられる。

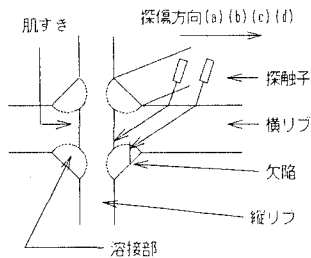
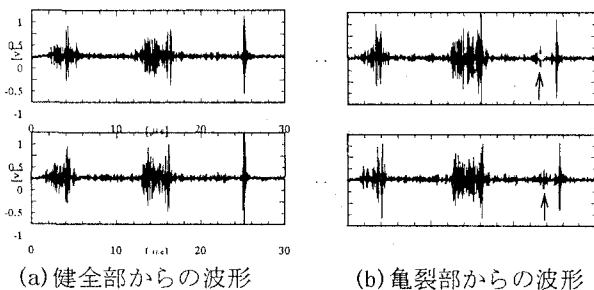


図 12 超音波伝達経路 (a-a 断面)

このときのエコー波形に着目して比較したものが図 13 である。図 13(a) が健全部からのエコー波形、(b) は亀裂と予想される部分からのものである。2~5  $\mu\text{s}$  のエコーは表面エコー、12~17  $\mu\text{s}$  のエコーは二次的な表面エコー（探触子と供試体表面を 2 往復する波）と考えられる。注目するエコーは 25  $\mu\text{s}$  のものである。これは肌すきからのものである。20~25  $\mu\text{s}$  のエコーに注目すると (b) の亀裂部からの波形には (a) では見られない小さなエコーが確認（矢印）できる。これが反射・散乱の原因であり、疲労亀裂と考えられる。

また、探傷条件を入射角 22.5 度（屈折角 60 度）とした直射法で探傷を行ったときの探傷画像（探傷範囲 15 × 40mm、ピッチ 0.1mm）が図 14 である。図 14 では亀裂部からのエコーが C スコープ画像にも現れている。これは角度を変化させたことと斜角探傷の手法を 1 回反射法から直射法に変えたので、鋼材の中を超音波が伝達する距離が短くなり、亀裂からのエコーが強くなったからと



(a) 健全部からの波形 (b) 亀裂部からの波形

図 13 波形データ (入射角 18.9 度)

考えられる。

図 15 にこの時のエコー波形を示す。(a) から (d) は走査方向を示してあり、図 12 にあるように (a) から順に縦リブから離れていくことを示している。

図 15(a) の 0~2  $\mu\text{s}$  のエコーは表面エコーであり、10  $\mu\text{s}$  のエコーが肌すきからのものである。(a) で 8  $\mu\text{s}$  に現れているエコーに注目すると (a) → (b) → (c) → (d) と次第に強くなる。これは超音波の伝達経路に亀裂部があるため、早い時間に亀裂からのエコーが現れたのである。

以上のことから入射角を変化することによって亀裂部からのエコーを C スコープ画像からでもはっきりととることができた。このように疲労亀裂を超音波探傷で精度よく検出するためには、様々な方法で検討するとよいが、隅肉溶接部の疲労亀裂を検出する場合には溶接の影響を避けるためにも多少大きめの

入射角がよいと考えられる。超音波探傷試験結果より静的載荷試験で予測した位置に疲労亀裂が発生していることが確認できた。

## 5. 舗装解析

### 5-1 舗装解析の概要

解析は 3 章で用いたモデルに舗装モデルを加えて行った。舗装のモデルは厚さ 80mm の普通の 1 層のみ

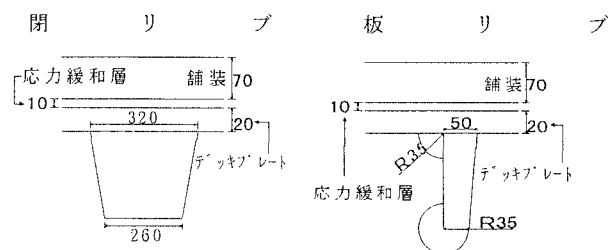


図 17 解析モデル詳細（応力緩和層有り）



載荷 316 万回

図 14 入射角 22.5 度 - 直射法

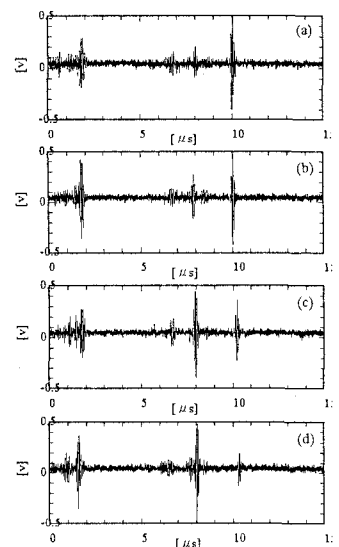


図 15 波形データ (入射角 22.5 度)

の舗装モデルと 10mm の応力緩和層の上に 70mm の舗装を乗せたモデル (図 16) の 2 種類で行った。

舗装のヤング率は 10000kgf/cm<sup>2</sup> (夏季)、30000kgf/cm<sup>2</sup> (春季・秋季)、50000kgf/cm<sup>2</sup> (冬季) と季節で分け、舗装表面の横断方向ひずみが冬季で 300μ 以上になると舗装亀裂が発生するものと考えた。

## 5-2 解析結果

### 1) 縦リブ形状による比較

閉じリブは横筋のたわみにともない、ねじれ変形を起こしている。そのため局所的な変形が大きくなっている。しかし、板リブにはこのような局所的な変形は見られない。そのため、表 4 及び表 6 で板リブと閉じリブの舗装表面の横断方向ひずみを比較すると閉じリブの方がひずみの値が大きくなり、舗装亀裂のみに関しては板リブの方が有利な構造であると考えられる。

### 2) ヤング率による比較

表 4 と表 5 より、舗装表面の横断方向ひずみはヤング率が小さいほど大きくなっている。これは、ヤング率が小さいほど変形が大きくなるためである。

### 3) 応力緩和層の効果

応力緩和層を用いることで舗装表面の横断方向ひずみを減少できるのは表 4 と表 5 より明らかである。具体的には応力緩和層を用いることにより、板リブの上スカラップが有る場合で 23.3%、閉じリブの上スカラップ有りの場合、Type B では圧縮 1.5%、引張 3.6%、Type D では圧縮 8.9%、引張 5.6%減少している。ひずみの値も冬季は 300μ 以下となっており、合理化鋼床版桁橋としても舗装亀裂を防止できると考えられる。

### 4) 上スカラップの有無による比較

表 5 より板リブの場合は、上スカラップを省略することでさらにひずみを減少でき、舗装亀裂防止につながると考えられる。しかし、閉じリブは上スカラップを省略すると引張ひずみが増加する傾向があり、舗装亀裂防止の効果は期待できないと考えられる。

### 5) スカラップ形状による比較 (閉じリブ)

Type A と Type B,D を比較すると、Type B,D はひずみの値が小さく舗装亀裂防止に有利な形状であると言える。また先に述べたように Type B,D は疲労に対しても有利な形状であるため、このような形状のスカラップを使用するのが望ましいと考えられる。

## 6. 荷重位置による舗装亀裂への影響

### 6-1 解析概要

この解析は舗装表面の横断方向ひずみが大きい閉じリブで行った。解析モデルは 5 章のモデルを使用し、スカラップ形状は Type D を用いた。荷重は図 18 のように 5tf を 4 箇所に載荷し、横断方向に少しずつ移動させ、舗装表面の横断方向ひずみが最大となる位置を調べた。図 19 は着目交差部側の主な荷重位置の図で、荷重は全

表 4 舗装表面の橋軸直角方向ひずみの比較 (閉じリブ)

スカラップ形状	ヤング率 kgf/cm <sup>2</sup>	上スカラップ有り		上スカラップ無し		
		最大圧縮ひずみ	最大引張ひずみ	最大圧縮ひずみ	最大引張ひずみ	
1層舗装	Type A	10000	539 μ	502 μ		
		30000	402 μ	376 μ		
		50000	308 μ	304 μ		
	Type B	10000	431 μ	345 μ	424 μ	392 μ
		30000	322 μ	270 μ	320 μ	305 μ
		50000	261 μ	224 μ	260 μ	252 μ
Type D	10000	475 μ	379 μ	405 μ	380 μ	
	30000	339 μ	288 μ	307 μ	297 μ	
	50000	270 μ	233 μ	250 μ	247 μ	
応力緩和層有り	Type A	10000	455 μ	412 μ		
		30000	340 μ	301 μ		
		50000	282 μ	249 μ		
	Type B	10000	422 μ	357 μ	415 μ	379 μ
		30000	315 μ	271 μ	312 μ	281 μ
		50000	257 μ	216 μ	259 μ	226 μ
	Type D	10000	395 μ	352 μ	396 μ	365 μ
		30000	297 μ	268 μ	299 μ	270 μ
		50000	246 μ	220 μ	248 μ	217 μ

表 5 舗装表面の橋軸直角方向ひずみの比較 (板リブ)

	ヤング率 kgf/cm <sup>2</sup>	上スカラップ有り	上スカラップ無し
		最大圧縮ひずみ	最大圧縮ひずみ
1層舗装	10000	125 μ	121 μ
	30000	123 μ	120 μ
	50000	120 μ	117 μ
応力緩和層有り	10000	125 μ	119 μ
	30000	107 μ	100 μ
	50000	92 μ	85 μ

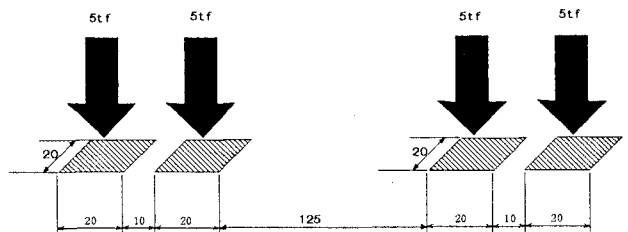


図 18 載荷荷重の詳細

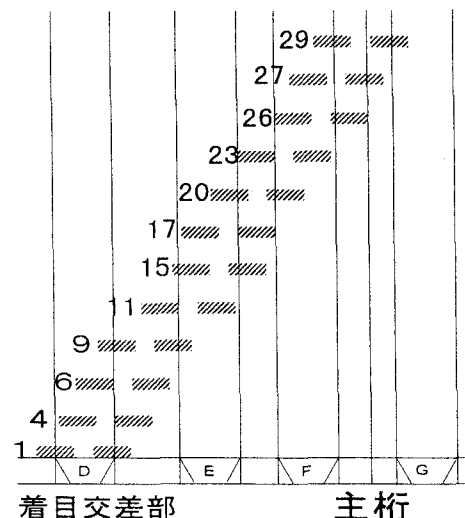


図 19 荷重位置

部で 29 箇所に移動してかけた。またそれぞれの荷重位置で舗装表面の横断方向ひずみを求め、図 20 のグラフを書いた。

## 6-2 解析結果

圧縮ひずみは 4、11、17、26 付近で大きくなり、これらの位置は縦リブ間または縦リブウェブ間に載荷したときである。引張ひずみは 6、11、23、27 付近で大きくなり、これらの位置は縦リブの右側ウェブを挟むときや縦リブの左側ウェブ上に載荷したときである。

先に述べたが、縦リブは横桁のたわみの影響でねじれている。そのため、舗装表面のひずみは縦リブの左側が圧縮ひずみ、右側が引張ひずみとなっており、このねじれ変形の影響が荷重を横断方向に移動したときのひずみの値に現れている。

圧縮ひずみは荷重部が直接ひずみにつながるため、縦リブ左側ウェブより少しウェブ間へずれた位置に載可されたときが最も大きくなり、引張ひずみは縦リブ左側ウェブ上に載荷され、ねじれの影響で縦リブ右側ウェブを持ち上げるように載荷されたときが最も大きくなる。また、ひずみの値も  $300\mu$  以上になる箇所もあるため、さらに舗装亀裂防止対策を進めていくことが必要である。

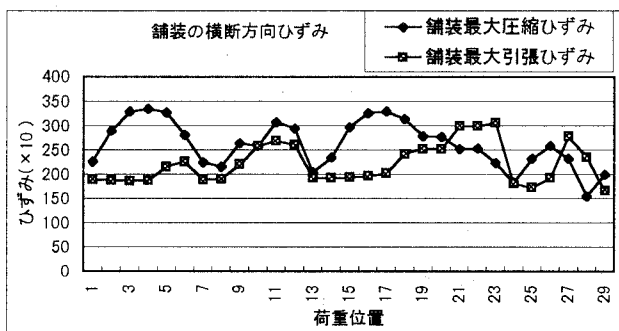


図 20 荷重位置による舗装表面の横断方向ひずみ

## 7. まとめ

以上の解析結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 疲労に対しては、板リブを用いた場合の横桁スカラップは省略することが望ましいが、できなければ通常用いられている J 型スカラップがよい。
- 2) 閉じリブを用いた場合の横桁スカラップ形状としてはその形状により横桁応力に大きな差があり、結論的には本研究の Type B,D のような形状が好ましい。
- 3) 超音波探傷により隅肉溶接内部に発生する疲労亀裂を精度よく検出するためには、適切な入射角で探傷することが必要である。また、溶接の影響を避けるためにも多少大きめの入射角がよいと考えられる。
- 4) 舗装の縦亀裂防止に関しては、応力緩和層を用いることは有効であることが確かめられた。また、疲労を考慮したスカラップを用いた合理化鋼床版桁橋による全体解析を行い、舗装表面の横断方向ひずみと亀裂防止対策

について検討した。

5) 閉じリブを用いた場合、車両走行位置により舗装表面の横断方向ひずみは大きく異なることがわかった。さらに、その位置によりひずみが  $300\mu$  以上になる場合もあり、さらに舗装亀裂防止対策を向上させる必要がある。

本論文の舗装解析は舗装を弾性体として扱った。しかし、舗装は粘弾性体である<sup>6)</sup>。そのため今後は粘弾性解析を行う必要があり、本研究ではさらに舗装亀裂防止の対策を行う予定である。

本論文の遂行にあたり、合理化鋼床版桁橋の設計及び応力解析は(株)日本製鋼所、村井正光、佐藤和則両氏と渡辺昇北海道大学名誉教授に、また舗装解析は北海道大学大学院工学研究科、森吉昭博教授に貴重な御指導を頂きここに記して感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労、鋼構造シリーズ 4、1990-9
- 2) 大島、山崎、熱海、小枝、佐藤：合理化に対応した鋼床版構造の提案、鋼構造年次論文報告集 No5、pp. 175-182、1997. 11
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1980
- 4) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針 1995-12
- 5) 北原、檜垣、渡辺：鋼床版の横リブ設計法の研究(その 1)、住友重機技報第 36 巻第 106 号、1988-4
- 6) 天野、森吉、鏡、笠原：アスファルト舗装の熱応力と変形の粘弾性解析、土木学会論文集 No. 564/V-35、pp. 23-32、1997. 5